



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 101 22 517 C 1

⑲ Aktenzeichen: 101 22 517.2-26
⑳ Anmeldetag: 9. 5. 2001
㉑ Offenlegungstag: -
㉒ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 20. 6. 2002

⑤1 Int. Cl. 7:
F 02 D 41/00
F 02 D 45/00
F 02 D 41/22
G 01 P 3/481
G 05 D 19/00

DE 101 22 517 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

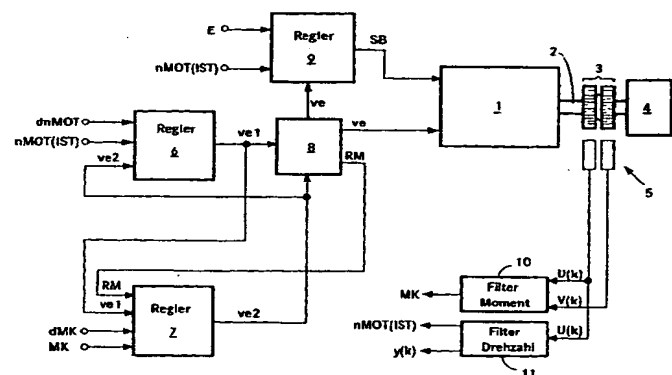
⑦3 Patentinhaber:
MTU Friedrichshafen GmbH, 88045
Friedrichshafen, DE

⑦2 Erfinder:
Dölker, Armin, Dipl.-Ing., 88090 Immenstaad, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
EP 00 59 585 B1

⑤4 Drehzahl-Filter

⑤7 Für eine Brennkraftmaschine wird ein Drehzahl-Filter (11) vorgeschlagen. Das Drehzahl-Filter (11) enthält hierbei eine Berechnungsvorschrift (BV(i)) mittels der eine Drehschwingung i-ter Ordnung vollständig oder teilweise eliminiert wird. Hierdurch wird die Dynamik sowie die Robustheit des Drehzahl-Regelkreises erhöht.



DE 101 22 517 C 1

Express Label No.
EV343679645US

[0001] Die Erfindung betrifft ein Drehzahl-Filter für eine Brennkraftmaschine deren Drehzahl in Form von Zahnzeiten einer Welle erfasst wird. Aus den Zahnzeiten wird mittels eines Drehzahl-Filters eine gefilterte Zahnzeit, entsprechend dem Ist-Drehzahlwert, bestimmt.

[0002] Eine als Generatorantrieb vorgesehene Brennkraftmaschine wird üblicherweise an den Endkunden ohne Kupplung und Generator ausgeliefert. Die Kupplung und der Generator werden erst beim Endkunden montiert. Um eine konstante Nennfrequenz zur Strom-Einspeisung in das Netz zu gewährleisten, wird die Brennkraftmaschine in einem Drehzahl-Regelkreis betrieben. Hierbei wird die Drehzahl der Kurbelwelle als Regelgröße erfasst und mit einem Motordrehzahl-Sollwert, der Führungsgröße, verglichen. Die daraus resultierende Regelabweichung wird über einen Drehzahl-Regler in eine Stellgröße für die Brennkraftmaschine, beispielsweise eine Einspritzmenge, gewandelt. Bei einem derartigen Regelkreis besteht ein Problem darin, dass Drehschwingungen, die der Regelgröße überlagert sind, vom Drehzahl-Regler verstärkt werden können. Besonders kritisch sind die von der Brennkraftmaschine verursachten niederfrequenten Schwingungen, beispielsweise die Drehschwingungen 0.5-ter und 1-ter Ordnung. Beim Starten der Antriebsanlage können die Amplituden der Drehschwingungen durch die Verstärkung des Drehzahl-Reglers so groß werden, dass eine Grenzdrehzahl überschritten und die Brennkraftmaschine abgestellt wird.

[0003] Dem Problem der Instabilität wird durch ein Drehzahl-Filter im Rückkopplungs- und/oder Vorwärtsweg des Drehzahl-Regelkreises begegnet. Aus der EP 0 059 585 B1 ist ein derartiges Drehzahl-Filter bekannt. Bei diesem werden die Zahnzeiten einer Welle über ein Arbeitsspiel der Brennkraftmaschine erfasst. Unter Arbeitsspiel sind zwei Umdrehungen der Kurbelwelle, entsprechend 720 Grad, zu verstehen. Aus diesen Zahnzeiten wird danach über arithmetische Mittelwertbildung eine gefilterte Zahnzeit berechnet. Aktualisiert wird diese nach jedem Arbeitsspiel. Diese gefilterte Zahnzeit entspricht dem Ist-Drehzahlwert, welche sodann zur Regelung der Brennkraftmaschine verwendet wird. Problematisch bei diesem 2-Umdrehungs-Filter ist jedoch, dass ein stabiles Verhalten der Antriebsanlage mit einer Verschlechterung des Lastannahme-Verhaltens einhergeht.

[0004] Der Erfindung liegt insofern die Aufgabe zugrunde, das Drehzahl-Filter zu optimieren.

[0005] Die Aufgabe wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst. In den Unteransprüchen sind die Ausgestaltungen hierzu dargestellt.

[0006] Gemäß der Erfindung enthält das Drehzahl-Filter eine Berechnungsvorschrift mittels der eine Drehschwingung i-ter Ordnung vollständig oder teilweise eliminiert wird.

[0007] Beispielsweise wird die Drehschwingung 0.5-ter Ordnung über eine Berechnungsvorschrift vollständig eliminiert, welche vorsieht, dass die aktuelle Zahnzeit mit der eine Umdrehung zurückliegenden Zahnzeit addiert wird. Gegenüber dem 2-Umdrehungs-Filter aus dem Stand der Technik ergibt sich somit der Vorteil, dass der Ist-Drehzahlwert bereits zu einem früheren Zeitpunkt vorliegt. Die Drehzahlerfassung ist gegenüber dem Stand der Technik also schneller. Mit anderen Worten, die Dynamik des Drehzahl-Regelkreises wird erhöht ohne das stabile Verhalten der Antriebsanlage zu gefährden. Um die Einflüsse von Fertigungstoleranzen der Messräder zu minimieren, ist gemäß der Erfindung vorgesehen, dass die Zahnzeiten über einen vorgebbaren Winkel der Welle erfasst werden. Als weitere Maßnahme ist vorgesehen, dass das Drehzahl-Filter zusätz-

lich ein Kompensationsglied, bestehend aus einem Tiefpass und einem differenziellen Glied, zur Berechnung der gefilterten Zahnzeit aufweist. Über die Kombination der Erfindung mit anderen Übertragungsfunktionen, z. B. Mittelwertfilter, können neue Frequenzgänge kreiert werden. Die Erfindung bietet insgesamt also den Vorteil, dass der Drehzahl-Regelkreis sehr robust gegenüber den Störgrößen ist, beispielsweise Temperatur und Fertigungstoleranz der Kupplung. Bekanntermaßen verringert sich die Resonanzfrequenz der Antriebsanlage bei höheren Temperaturen.

[0008] In den Zeichnungen ist ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel dargestellt. Es zeigt:

[0009] Fig. 1 ein Blockschaltbild

[0010] Fig. 2 ein Drehzahl-Zeit-Diagramm eines Startvorgangs

[0011] Fig. 3 ein Drehzahl-Zeit-Diagramm

[0012] Fig. 4 ein Blockschaltbild des Filters

[0013] Fig. 5, 7 ein Amplitudengang-Frequenz-Diagramm

[0014] Fig. 6, 8 ein Phasengang-Frequenz-Diagramm

[0015] Fig. 1 zeigt ein Blockschaltbild des Regelsystems der Brennkraftmaschine 1 mit gekoppelter Regelkreisstruktur. Dargestellt sind: ein Drehzahl-Regler 6, ein Motormoment-Regler 7, ein Auswahlmittel 8, ein Einspritzbeginn-Regler 9 und die Brennkraftmaschine 1 mit dem Einspritzsystem, beispielsweise ein Common-Rail-System. Die Brennkraftmaschine 1 treibt via Welle 2 eine Motorlast 4 an, also beispielsweise einen Generator oder Schiffsantrieb. Auf der Welle 2 sind Zahnräder 3 angeordnet. Die Zahnzeiten $U(k)$ und $V(k)$ der Zahnräder 3 werden von Drehzahl-Sensoren 5 detektiert. Aus der aktuellen Zahnzeit $U(k)$ wird über ein Drehzahl-Filter 11 eine gefilterte Zahnzeit $y(k)$ oder entsprechend eine Ist-Drehzahl $nMOT(IST)$ berechnet. Über das Moment-Filter 10 wird das Motor-Moment MK am Abtrieb der Brennkraftmaschine 1 ermittelt. Die Ist-Motordrehzahl $nMOT(IST)$ wird bei dieser Regelkreisstruktur als Eingangsgröße für den Drehzahl-Regler 6 und den Einspritzbeginn-Regler 9 verwendet.

[0016] Die Eingangsgrößen des Drehzahl-Reglers 6 sind: die Ist-Motordrehzahl $nMOT(IST)$, eine Drehzahldifferenz $dnMOT$ und ein Signal $ve2$. Die Drehzahldifferenz $dnMOT$ berechnet sich aus der Ist-Motordrehzahl $nMOT(IST)$ und einer Soll-Motordrehzahl $nMOT(SOLL)$. Das Signal $ve2$ entspricht dem Ausgangssignal des Motormoment-Reglers 7. Die Ausgangsgröße des Drehzahl-Reglers 6 ist ein Signal $ve1$. Dieses ist auf das Auswahlmittel 8 und den Motormoment-Regler 7 geführt. Die Eingangsgrößen des Motormoment-Reglers 7 sind: das Motor-Moment MK , ein Differenzmoment dMK , das Signal $ve1$ und ein Reglermodus RM . Das Differenzmoment dMK berechnet sich aus dem Motor-Moment MK und einem maximal zulässigen Motor-Moment. Das Ausgangssignal des Motormoment-Reglers 7 ist das Signal $ve2$. Dieses ist auf das Auswahlmittel 8 und den Drehzahl-Regler 6 geführt. Über das Auswahlmittel 8 wird festgelegt, welcher der beiden Regler 6 bzw. 7 dominant ist, beispielsweise über eine Minimalwertauswahl der beiden Signale $ve1$ und $ve2$. Die Ausgangssignale des Auswahlmittels 8 sind ein leistungsbestimmendes Signal ve und der Reglermodus RM . Das leistungsbestimmende Signal ve wird auf die Einspritzeinrichtung der Brennkraftmaschine 1 und den Einspritzbeginn-Regler 9 geführt. Unter leistungsbestimmendem Signal ve sind die Einspritzmenge oder der Regelweg einer Regelstange zu verstehen.

[0017] Die Eingangsgrößen des Einspritzbeginn-Reglers 9 sind: die Ist-Motordrehzahl $nMOT(IST)$, das vom Auswahlmittel 8 bereitgestellte leistungsbestimmende Signal ve und weitere Eingangsgrößen E , beispielsweise der Verbrennungs-Höchst-Druck. Die Ausgangsgröße des Einspritzbe-

ginn-Reglers 9 ist ein Einspritzbeginn SB, welcher auf die Brennkraftmaschine 1 geführt ist. Da das Zusammenwirken des Drehzahl-Reglers 6 mit dem Motormoment-Regler 7 und dem Einspritzbeginn-Regler 9 für das Verständnis der Erfindung nicht relevant ist, wird auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet.

[0018] Der Drehzahl-Regelkreis besteht, wie in Fig. 1 dargestellt, aus folgenden Komponenten: Drehzahl-Regler 6, die Brennkraftmaschine 1, Drehzahlsensoren 5 zur Erfassung der Zahnzeiten und eine Rückkopplung mit Drehzahl-Filter 11.

[0019] Fig. 2 zeigt ein Drehzahl-Zeit-Diagramm für einen Startvorgang einer Antriebseinheit, beispielsweise einer Brennkraftmaschine mit Generator. Als strichpunktierte Linie ist die Führungsgröße für die Drehzahl-Regelung, entsprechend der Soll-Drehzahl $n_{MOT}(SOLL)$, dargestellt. Als durchgezogene Linie ist die Ist-Drehzahl $n_{MOT}(IST)$ eingezeichnet. Zum Zeitpunkt t1 wird die Führungsgröße von einem Anfangswert n1 bis zum Zeitpunkt t2 auf den Wert n2 rampenförmig erhöht. Vom Zeitpunkt t2 an bleibt die Führungsgröße unverändert. Die Ist-Drehzahl $n_{MOT}(IST)$ folgt zunächst dieser Führungsgröße. Zum Zeitpunkt t2 überschreitet jedoch die Ist-Drehzahl $n_{MOT}(IST)$ den Vorgabewert n2. Während des Zeitraums t3 bis t4 beginnt die Ist-Drehzahl $n_{MOT}(IST)$ der Brennkraftmaschine zu schwingen. Die Ursachen für diese Drehzahl-Schwingungen können sein: eine unzulässig hohe Streuung der Injektoren, der Ausfall eines Injektors und/oder eine fehlerhafte Abstimmung der Gesamtanlage. Als besonders dominant bei diesen Drehschwingungen hat sich die 0.5-te Ordnung herausgestellt. Diese ist in Fig. 2 als Ausschnitt dargestellt. In der Praxis werden die Amplituden bei einer Brennkraftmaschine mit Betriebstemperatur zum Teil so groß, dass eine Drehzahlgrenze überschritten wird und ein Not-Stop ausgelöst wird. Hieraus resultiert der Ist-Drehzahl-Verlauf ab dem Zeitpunkt t4.

[0020] Fig. 3 zeigt einen Drehzahlverlauf n_{MOT} an der Kurbelwelle über der Zeit. Dargestellt sind zwei Drehschwingungen, entsprechend der 0.5-ten und 1-ten Ordnung während eines Arbeitsspiels, also 720 Grad der Kurbelwelle der Brennkraftmaschine. In Fig. 3 sind exemplarisch 5 Zahnzeiten dargestellt: $U(k - N)$, $U(k - (N - 1))$, $U(k - N/2)$, $U(k - N/4)$ und $U(k)$. Der Parameter N kennzeichnet hierbei die Anzahl der pro Arbeitsspiel erfassten Zahnzeiten. Mit $U(k)$ wird die aktuelle Zahnzeit bezeichnet. Unter Zahnzeit wird die Zeitdauer zwischen einem ersten Impuls und einem zweiten Impuls oder zwischen mehreren aufeinanderfolgenden Impulsen der Zahnräder 3 verstanden. In der Praxis kann der Winkelabstand zwischen zwei Zähnen z. B. 3 Grad betragen. Dies bedeutet, dass also für ein Arbeitsspiel der Brennkraftmaschine maximal 240 Zahnzeiten erfasst werden. Üblicherweise werden die Zahnzeiten hierbei in einem Ringspeicher abgelegt.

[0021] Aus der Fig. 3 wird ersichtlich, dass bei Addition der aktuellen Zahnzeit $U(k)$ und der eine Umdrehung zurückliegenden Zahnzeit $U(k - N/2)$ die Drehschwingung 0.5-ter Ordnung eliminiert wird. Die Drehschwingung 1-ter Ordnung kann vollständig eliminiert werden, indem die aktuelle Zahnzeit $U(k)$ mit der eine halbe Umdrehung zurückliegenden Zahnzeit $U(k - N/4)$ addiert wird. Die entsprechende mathematische Umsetzung in eine Berechnungsvorschrift BV(i) zur vollständigen Eliminierung der Drehschwingung i-ter Ordnung stellt sich wie folgt dar:

$$y1(k) = y1(k - 1) + (1/F)[(U(k) + k1 U(k - F))$$

mit

$y1(k)$ aktuelle gefilterte Zahnzeit

$y1(k - 1)$ 2/N Umdrehungen zurückliegende gefilterte Zahnzeit

N Anzahl der pro Arbeitsspiel erfassten Zahnzeiten

$F N/(4i)$

i Ordnung der zu eliminierenden Drehschwingung

$U(k)$ aktuelle Zahnzeit

$U(k - F) 1/(2i)$ Umdrehungen zurückliegenden Zahnzeit

k1 Bewertungs-Faktor, Wert gleich Eins

[0022] In Fig. 4 ist ein Blockschaltbild des Drehzahl-Filters 11 dargestellt. Die Eingangsgrößen sind die Zahnzeiten $U(k)$. Diese Zahnzeiten $U(k)$ entsprechen den über 2/N Kurbelwellenumdrehungen erfassten Zahnzeiten. Die Ausgangsgröße ist eine gefilterte Zahnzeit $y(k)$, alternativ die Ist-Drehzahl $n_{MOT}(IST)$. Die Zahnzeiten $U(k)$, $U(k - (N/2))$ usw. stellen die Eingangsgröße für einen Funktionsblock Berechnungsvorschrift BV(i), Bezugszeichen 12, dar. Mittels der Berechnungsvorschrift BV(i) wird eine Zahnzeit $y1(k)$ ermittelt, die die Drehschwingung i-ter Ordnung nicht mehr enthält. Da die Berechnungsvorschrift BV(i) bedingt durch das Addieren von Zahnzeiten einen instabilen Algorithmus darstellt (integrales Verhalten), erfolgt durch Nachschalten eines Kompensationsglieds 15 eine Stabilisierung des Algorithmus. Das Kompensationsglied 15 besteht hierbei zumindest aus einem differenziellen Übertragungsglied (D-Glied) 13. Ein Tiefpass 14 kann nachgeschaltet werden. Mathematisch bedeutet dies, dass die Übertragungsfunktionen der Berechnungsvorschrift BV(i), des differenziellen Gliedes 13 und des Tiefpasses 14 miteinander multipliziert werden. Die gefilterte Zahnzeit $y(k)$ stellt die Ausgangsgröße des Kompensationsgliedes 15 dar. Mittels des Funktionsblocks 16 erfolgt die Umrechnung in die Motordrehzahl $n_{MOT}(IST)$.

[0023] Die diskrete Übertragungsfunktion $G(z)$ des Drehzahl-Filters lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$G(z) = y(z)/U(z)$$

mit

$$z = e^{Exp(sTa)}$$

[0024] Hierbei gilt:

Ta Abtastzeit des Filteralgorithmus

$y(z)$ z-transformierte gefilterte Zahnzeit $y(k)$

$U(z)$ z-transformierte ungefilterte Zahnzeit $U(k)$

[0025] Die Fig. 5 und 6 stellen für die stationäre Motordrehzahl 1500 l/min sowohl den Amplitudengang (Fig. 5) als auch den Phasengang (Fig. 6) einer ersten Übertragungsfunktion G1 dar. Hierbei wurde als Tiefpass ein PT1-Glied mit einer Zeitkonstanten T1 von 5 msec verwendet und die Zahnzeiten über einen Kurbelwellenwinkel von 90 Grad erfasst. Man erkennt, dass die Drehschwingung 0.5-ter Ordnung (12,5 Hz) vollständig eliminiert wird.

[0026] In den Fig. 5 und 6 sind zusätzlich der Amplituden- und der Phasengang des 2-Umdrehungs-Filters aus dem Stand der Technik dargestellt, Übertragungsfunktion G2. Man erkennt, dass die Übertragungsfunktion G1 den wesentlich günstigeren Phasengang aufweist, d. h. dass das 2-Umdrehungs-Filter einen wesentlich größeren Phasenverzögerung hat.

[0027] Wenn die Drehschwingung 0.5-ter Ordnung und die Drehschwingung 1-ter Ordnung teilweise eliminiert werden sollen, wird die Berechnungsvorschrift BV(i) folgendermaßen ausgeführt:

$$y1(k) = y1(k - 1) + (1/(N/2))[U(k) + k1 U(k - (N/2)) + k2 U(k - (N/4))]$$

mit

$y1(k)$ Aktuelle gefilterte Zahnzeit

$y_1(k-1)$ 2/N Umdrehungen zurückliegende gefilterte Zahnzeit

N Anzahl der pro Arbeitsspiel erfassten Zahnzeiten

$U(k)$ aktuelle Zahnzeit

$U(k - (N/2))$ 1 Umdrehung zurückliegende Zahnzeit

$U(k - (N/4))$ 0,5 Umdrehungen zurückliegende Zahnzeit

k_1, k_2 Bewertungs-Faktoren; $k_1 + k_2 = 1$

[0028] Typische Werte von k_1 sind 0,8 und von k_2 der Wert 0,2.

[0029] Wird für dieses Beispiel als Tiefpass wieder ein Filter 1-ter Ordnung (PT1-Glied) mit der Zeitkonstanten 5 msec verwendet und werden die Zahnzeiten über 90 Grad erfasst, so ergibt sich der in den Fig. 7 und 8 dargestellte Amplituden- und Phasengang (Übertragungsfunktion G3). Man erkennt, dass die Drehschwingung 0,5-ter Ordnung (12,5 Hz) nun nicht mehr vollständig eliminiert wird. Dafür wird aber die Drehschwingung 1-ter Ordnung stärker (25 Hz) gedämpft. Ein Vergleich der Phasengänge der Übertragungsfunktionen G1 und G3 zeigt, dass die Übertragungsfunktion G3 eine geringere Phasendrehung als die Übertragungsfunktion G1 aufweist.

[0030] Wie dargestellt ermöglicht es die Erfindung Drehschwingungen beliebiger Ordnung mit einem geringeren Phasenverzug als beim entsprechenden 2-Umdrehungs-Filter bzw. Mittelwertfilter aus dem Stand der Technik herauszufiltern. Dies hat eine höhere Stabilität und eine bessere Dynamik des Drehzahl-Regelkreis zur Folge. Da die Erfindung eine Zahnzeiten-Erfassung über einen vorgebbaren Winkel beinhaltet, können Einflüsse von Fertigungstoleranzen minimiert werden. Werden die Übertragungsfunktionen der Erfindung mit anderen Übertragungsfunktionen, z. B. von Mittelwertfiltern, kombiniert, können neue Frequenzgänge kreiert werden. Ebenso gestattet es die Erfindung, dass zusätzlich noch beliebig viele zeitlich zurückliegende Zahnzeiten einbezogen werden. Die Summe der einzelnen Bewertungsfaktoren k_1, k_2, \dots muss jeweils gleich 1 ergeben.

[0031] Bei einer Antriebsanlage mit weichen Kupplungen ergibt sich eine niederfrequente Resonanzfrequenz der Anlage. Liegt die Resonanzfrequenz im Bereich der Drehschwingung 0,5-ter Ordnung, so kann der Drehzahl-Regelkreis instabil werden. Wird jedoch das beschriebene Drehzahl-Filter verwendet, so liegt im Bereich der Drehschwingung 0,5-ter Ordnung eine sehr große Dämpfung vor, was eine stabilisierende Wirkung auf den Gesamtregelkreis hat. Die Erfindung ermöglicht dadurch eine größere Robustheit des Drehzahl-Regelkreises, da die meisten Antriebs-Anlagen eine Resonanzfrequenz kleiner 20 Hz haben. Insbesondere wird eine größere Robustheit gegenüber Temperatureinflüssen erreicht, da die Resonanzfrequenz der Antriebs-Anlage bei höherer Temperatur kleiner wird. Auch bezüglich Fertigungstoleranzen der Kupplung (Federkonstante C, Dämpfung) wird eine größere Robustheit erreicht. Ganz allgemein kann das Drehzahl-Filter immer dann angewendet werden, wenn punktsymmetrische periodische Störsignale eliminiert bzw. bedämpft werden sollen.

Bezugszeichenliste

- 1 Brennkraftmaschine
- 2 Welle
- 3 Zahnräder
- 4 Motorlast
- 5 Drehzahl-Sensoren
- 6 Drehzahl-Regler
- 7 Motormoment-Regler
- 8 Auswahlmittel
- 9 Einspritzbeginn-Regler

10 Moment-Filter

11 Drehzahl-Filter

12 Funktionsblock Berechnungsvorschrift

13 D-Glied

5 14 Tiefpass

15 Kompensationsglied

16 Funktionsblock Umrechnung

Patentansprüche

1. Drehzahl-Filter für eine Brennkraftmaschine (1) deren Drehzahl in Form von Zahnzeiten einer Welle erfasst wird und aus den Zahnzeiten mittels eines Filters eine gefilterte Zahnzeit, entsprechend dem Ist-Drehzahlwert, berechnet wird, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Drehzahl-Filter (11) eine Berechnungsvorschrift (BV(i), $i = 0,5, 1, 1,5, \dots$) zur vollständigen oder teilweisen Eliminierung einer Drehschwingung i-ter Ordnung enthält und mittels der Berechnungsvorschrift (8V(i)) die gefilterte Zahnzeit ($y(k)$, $k = 1, 2, 3, \dots$) bestimmt wird ($y(k) = f(BV(i))$), indem eine aktuelle Zahnzeit ($U(k)$) und zurückliegende Zahnzeiten ($U(k - (N/2))$, $U(k - (N/3))$) addiert werden.
2. Drehzahl-Filter (11) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zurückliegenden Zahnzeiten ($U(k - (N/2))$, $U(k - (N/3))$) mit Bewertungsfaktoren (k_1, k_2, \dots) gewichtet werden.
3. Drehzahl-Filter (11) nach Anspruch 1 und Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die gefilterte Zahnzeit ($y(k)$) zusätzlich über ein Kompensationsglied (15) bestimmt wird, wobei die Eingangsgröße ($y_1(k)$) des Kompensationsglieds (15) der Ausgangsgröße der Berechnungsvorschrift (BV(i)) entspricht.
4. Drehzahl-Filter (11) nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Kompensationsglied (15) zumindest aus einem differenziellen Glied (13) und vorzugsweise einem Tiefpass (14) besteht.
5. Drehzahl-Filter (11) nach Anspruch 3 und 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Drehschwingung i-ter Ordnung vollständig eliminiert wird, indem mittels der Berechnungsvorschrift (BV(i)) die gefilterte Zahnzeit ($y_1(k)$) aus der aktuellen Zahnzeit ($U(k)$) und der um $1/(2i)$ zurückliegenden Zahnzeit berechnet wird.
6. Drehzahl-Filter (11) nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Berechnungsvorschrift (BV(i)) in der Form ausgeführt wird:

$$y_1(k) = y_1(k-1) + (1/F)[(U(k) + k_1 U(k-F))]$$

mit

$y_1(k)$ aktuelle gefilterte Zahnzeit

$y_1(k-1)$ 2/N Umdrehungen zurückliegende gefilterte Zahnzeit

N Anzahl der pro Arbeitsspiel erfassten Zahnzeiten

$F N/(4i)$

i Ordnung der zu eliminierenden Drehschwingung

$U(k)$ aktuelle Zahnzeit

$U(k-F)$ 1/(2i) Umdrehungen zurückliegenden Zahnzeit

k_1 Bewertungsfaktor; Wert gleich Eins

7. Drehzahl-Filter (11) nach Anspruch 3 und 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Drehschwingung i-ter Ordnung teilweise eliminiert wird, indem die gefilterte Zahnzeit ($y_1(k)$) mittels folgender Berechnungsvorschrift (BV(i)) berechnet wird:

$$y_1(k) = y_1(k-1) + (1/F)[(U(k) + k_1 U(k-F) + \sum k_j U(k - (N/(4i + (j-1)))))]$$

mit
 $y_1(k)$ aktuelle gefilterte Zahnzeit
 $y_1(k-1)$ 2/N Umdrehungen zurückliegende gefilterte
 Zahnzeit 5
 N Anzahl der pro Arbeitsspiel erfassten Zahnzeiten
 $F N/4i$
 i Ordnung der zu eliminierenden Drehschwingung
 $U(k)$ aktuelle Zahnzeit
 $U(k-F) 1/(2i)$ Umdrehungen zurückliegende Zahnzeit 10
 k_1 Bewertungs-Faktor, $k_1 < 1$
 j Laufvariable j von 2 bis ∞
 k_j Bewertungs-Faktoren
 8. Drehzahl-Filter (11) nach Anspruch 7, dadurch ge-
 kennzeichnet, dass die Summe der Bewertungs-Fakto- 15
 ren (k_1, k_2, \dots) auf den Wert Eins gesetzt wird ($k_1 + k_2$
 $+ \dots = 1$).
 9. Drehzahl-Filter (11) nach den Ansprüchen 5 und 6
 oder 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, dass die aktu- 20
 elle Zahnzeit ($U(k)$) und die zurückliegenden Zahnzei-
 ten ($U(k - (N/2)), U(k - (N/3)), \dots$) über einen vorgeb-
 baren Winkel der Welle (2) gemittelt werden.
 10. Drehzahl-Filter (11) nach einem der vorausgegan-
 genen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das 25
 Drehzahl-Filter (11) mit einem weiteren Filter, insbe-
 sondere einem Mittelwertfilter, kombiniert wird.
 11. Drehzahl-Filter (11) nach einem der vorausgegan-
 genen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die
 Ordnung i der zu eliminierenden Drehschwingung auf 30
 einen festen Wert gesetzt wird oder mittels Frequenz-
 analyse berechnet wird.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

35

40

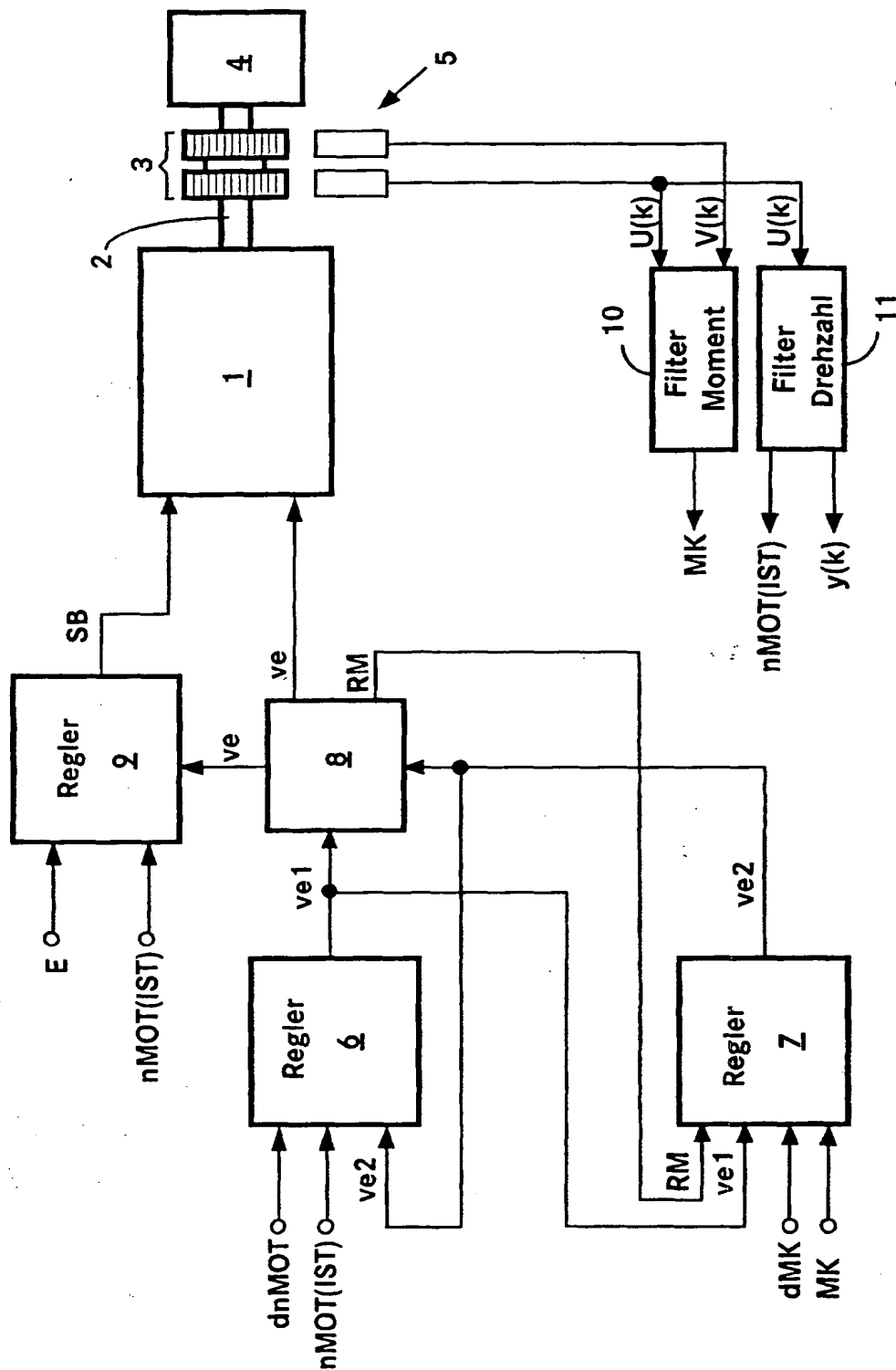
45

50

55

60

65



100

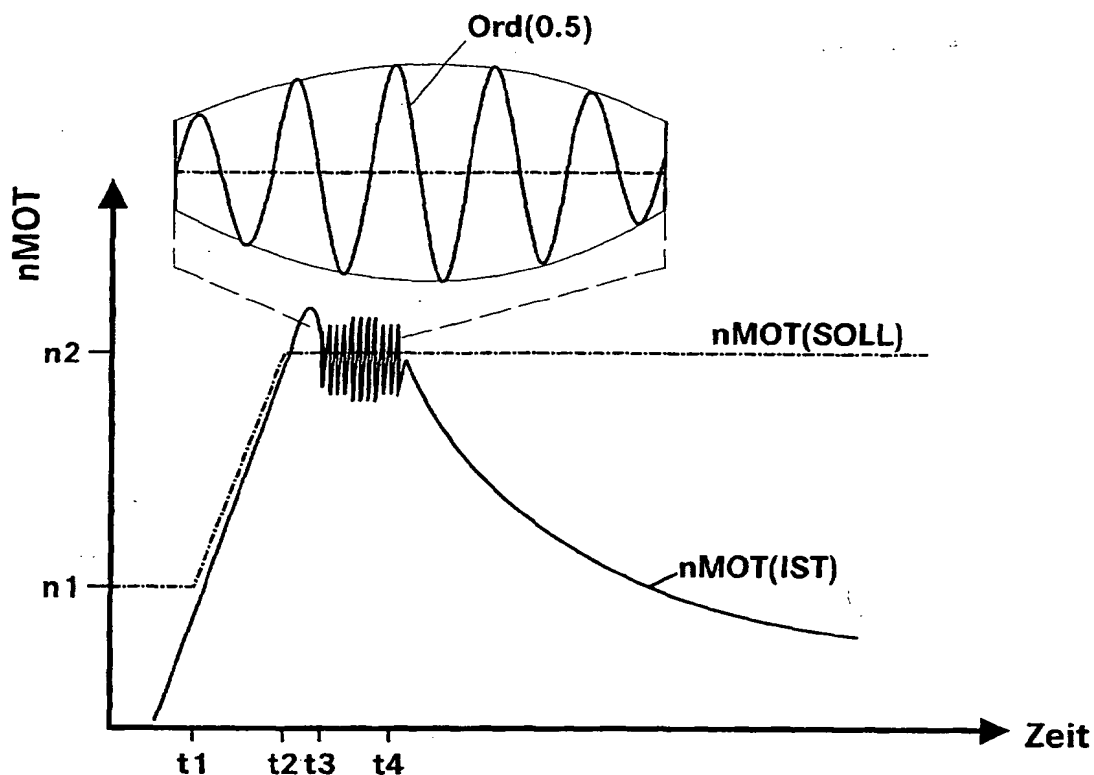


Fig. 2

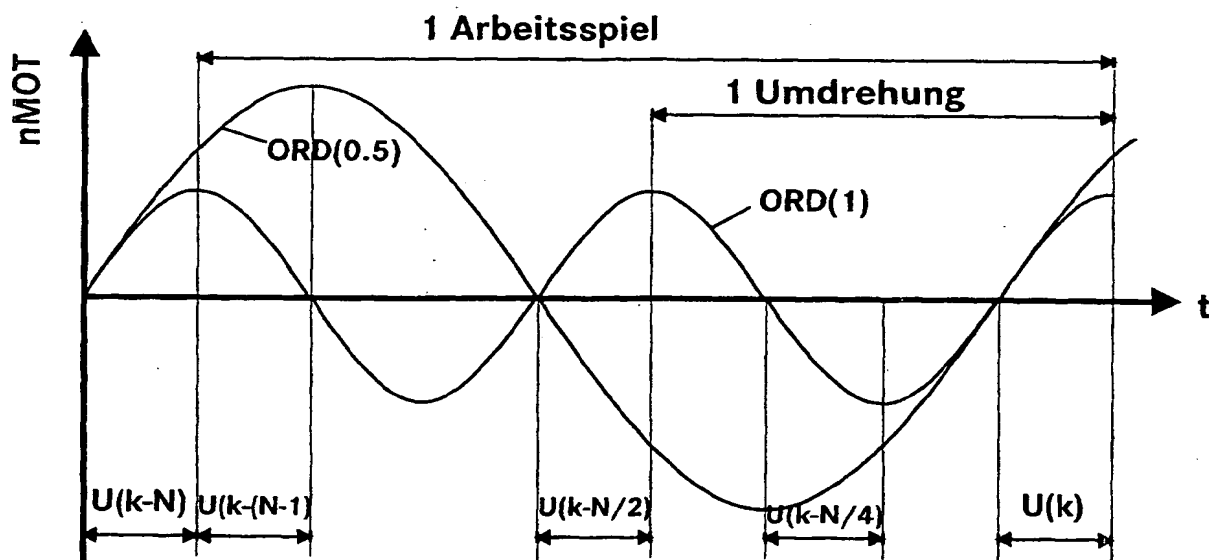


Fig. 3

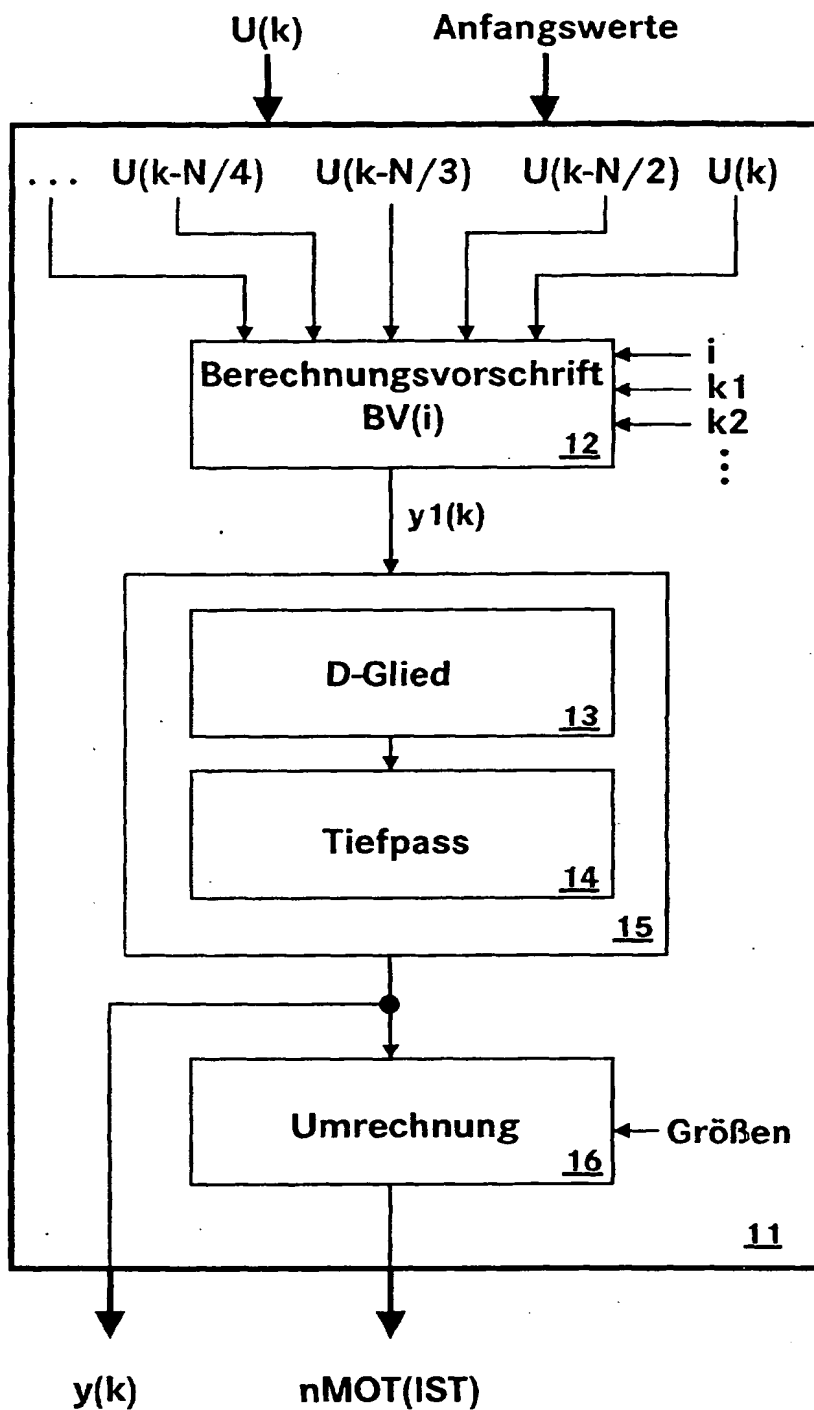


Fig. 4

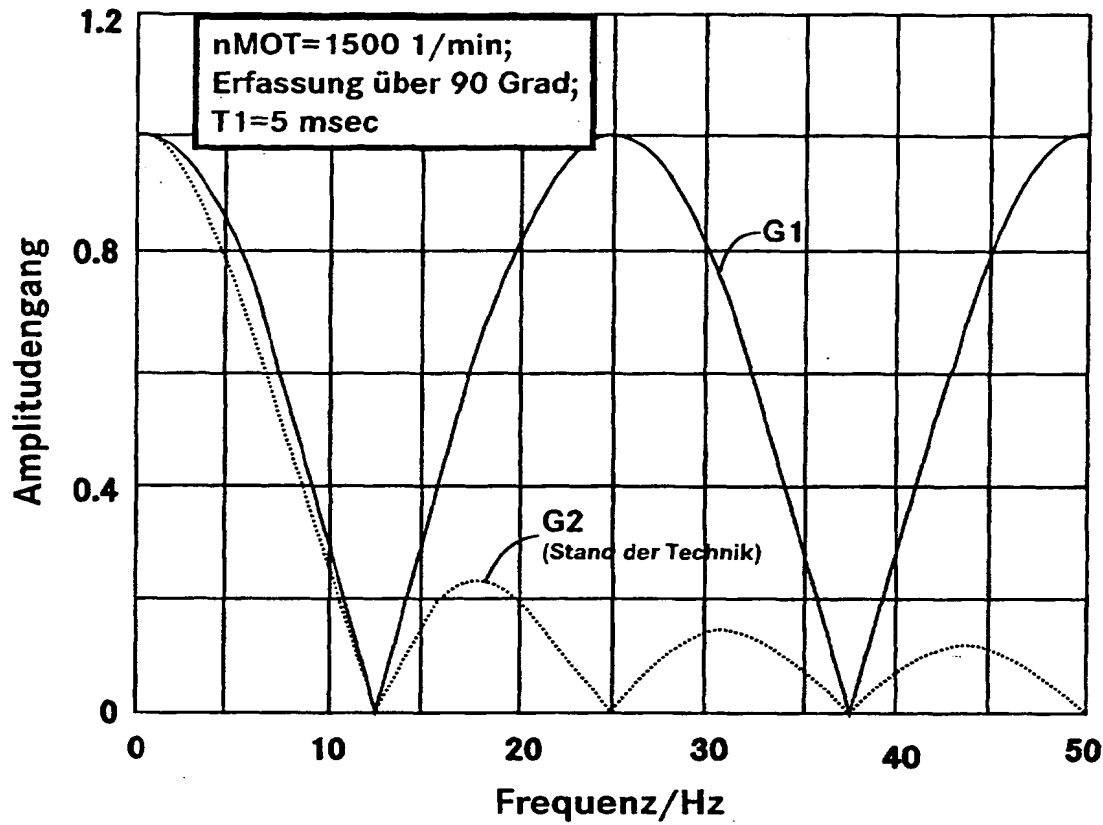


Fig. 5

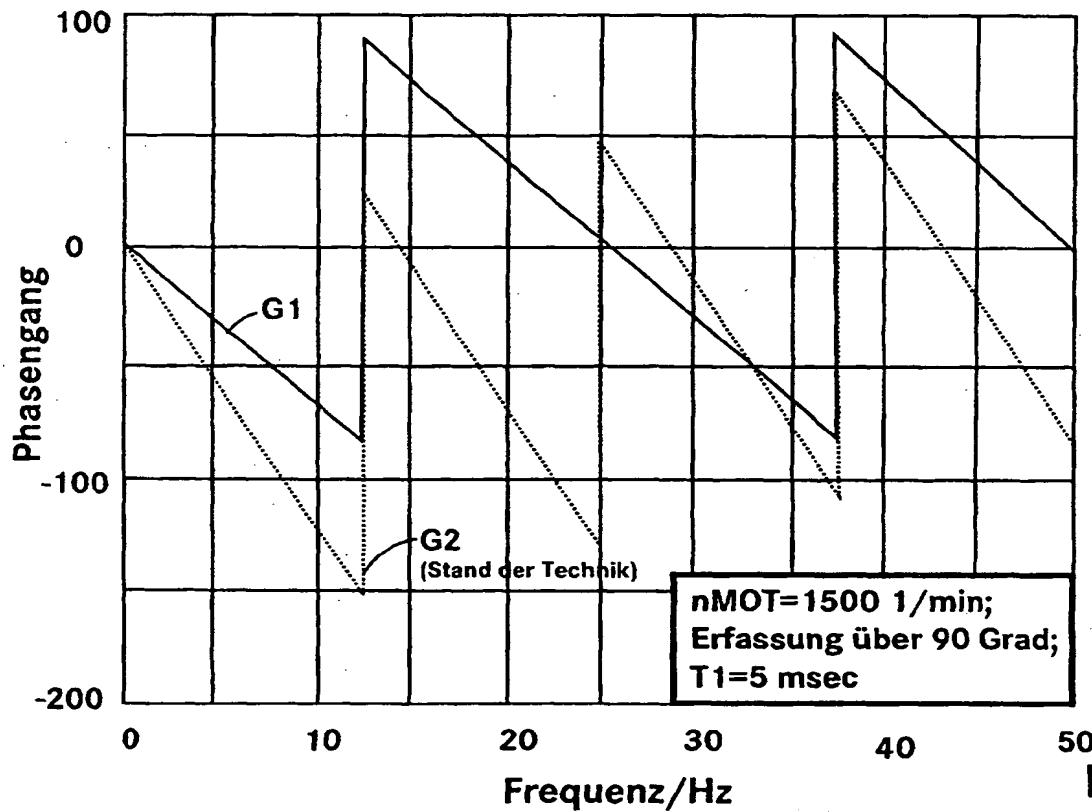


Fig. 6

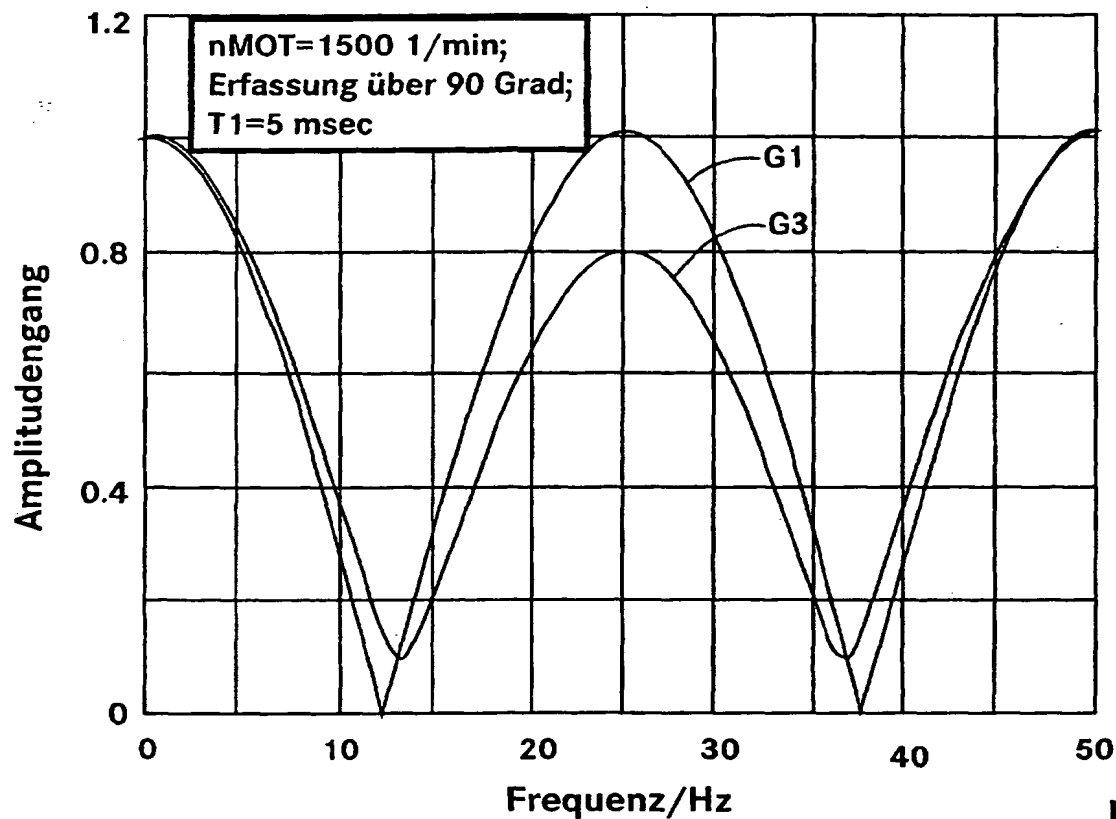


Fig. 7

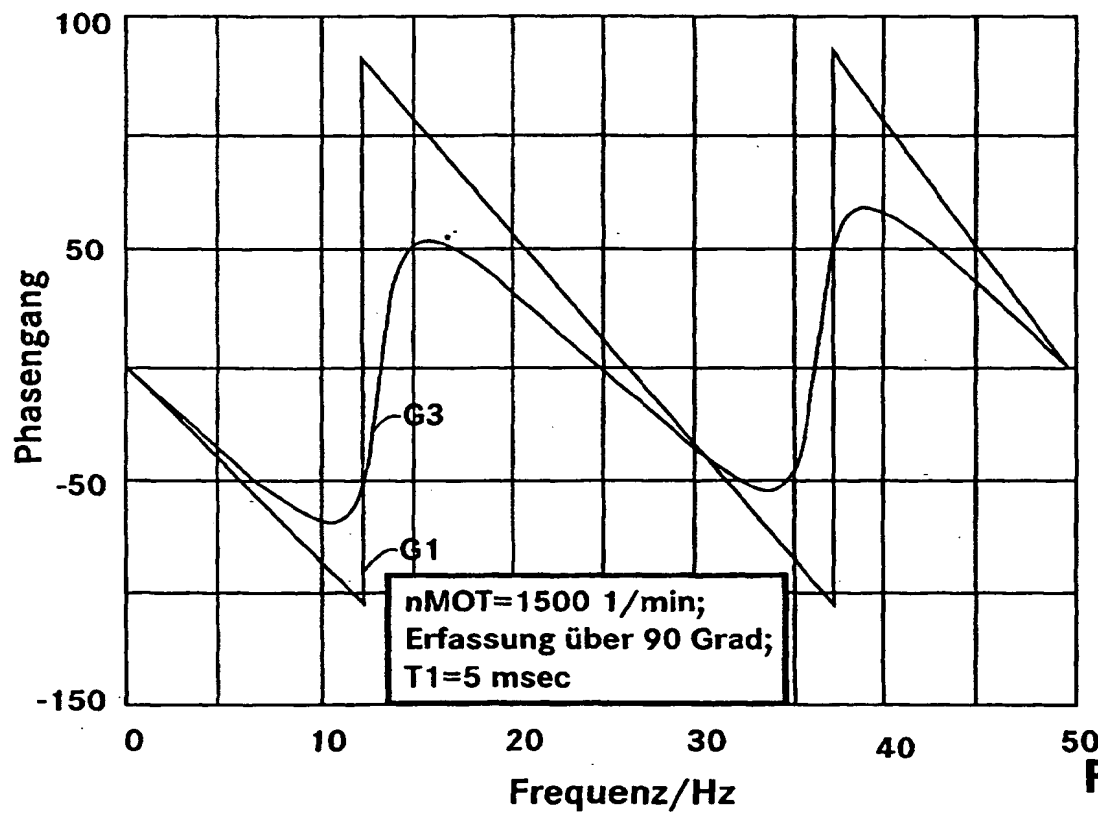


Fig. 8